

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.03.009

# 下穿既有环城公路的隧道爆破减振研究\*

赵立财<sup>①②</sup>

①台湾科技大学营建工程系(台湾台北,106)

②中铁十九局集团第三工程有限公司(辽宁沈阳,110136)

**[摘 要]** 针对下穿既有环城公路隧道爆破产生的振动效应,同时考虑隧道上方公路车辆载荷耦合作用,运用 LS-DYNA 分别对设置减振孔和未设减振孔两种工况下的隧道爆破进行数值模拟,对比分析对公路的缓冲减振效应。模拟结合实测结果表明:减振孔可使应力大幅波动的时间延后且持续时间缩短,降低应力波和地震波的叠加效应;在减振孔周边,最大减振率约为 41.7%,水平方向减振率明显高于垂直方向减振率;公路路面的最大减振率发生在中部,约为 19.1%;设置减振孔使公路振速大幅波动的持续时间减少了 50%。

**[关键词]** 隧道爆破;车辆载荷;下穿公路;缓冲减振;数值模拟

**[分类号]** U455.6

## Study on Vibration Reduction of Tunnel Blasting under Existing Ring Road

ZHAO Licai<sup>①②</sup>

①Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology  
(Taiwan Taipei, 106)

②Third Engineering Co. Ltd., China Railway 19th Bureau Group (Liaoning Shenyang, 110136)

**[ABSTRACT]** Aiming at the vibration effect caused by the tunnel blasting under the existing ring road, and considering the coupling effect of the vehicle load above the tunnel, LS-DYNA was used to numerically simulate the tunnel blasting under two working conditions of with or without vibration damping holes. And then, compare and analyze the vibration reduction on the ring road. The results show that damping holes can delay the time and shorten the duration of stress wave and reduce the superposition effect of stress wave and seismic wave. The maximum vibration reduction rate around the vibration damping holes is about 41.7%, and the reduction rate in the horizontal direction is significantly higher than that in the vertical direction. The maximum reduction rate of the ring road occurs in the middle of the road surface, which is about 19.1%. The duration of large fluctuation of highway vibration speed can be reduced by 50% by setting damping holes.

**[KEYWORDS]** tunnel blasting; vehicle load; under the highway; vibration reduction; numerical simulation

## 引言

立体化交通系统是城市发展重要的一环,而隧道工程又是其重要的组成部分<sup>[1-3]</sup>。隧道在爆破施工过程中产生的振动不可避免地会对城市既有结构物造成一定的损伤甚至破坏,产生一系列的安全问题<sup>[4-6]</sup>。因此,采取行之有效的减振措施,减小隧道爆破对邻近结构物的振动效应,具有重要的工程意义。

目前,国内外学者在隧道爆破振动响应研究的

基础上,主要从爆源和传播路径两个方面,通过现场监测、模型试验、理论分析及数值模拟提出了一系列有效的减振技术措施。高宇璠等<sup>[7]</sup>结合理论计算和实际监测数据提出了减振措施和优化爆破方案。张国胜等<sup>[8]</sup>对爆破产生的地震波信号进行分析,提出了相应的减振方法。在起爆方法上,石洪超等<sup>[9]</sup>采用掏槽炮孔间隔装药并采取孔内分段毫秒延迟起爆的方法,有效地控制了爆破振动强度。牛泽林等<sup>[10]</sup>提出,顺层分段爆破较左右分块爆破更具优越性。张袁娟等<sup>[11]</sup>利用有限元模拟与实验结合的方法进行对比分析,得到加入缓冲孔的爆破降振率最

\* 收稿日期:2021-10-18

基金项目:辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146)

第一作者:赵立财(1985-),男,博士,正高级工程师,主要从事地下结构抗震与岩土工程基础理论研究。E-mail: zhaolicai1314@foxmail.com

高达51%。Tian等<sup>[12]</sup>基于监测数据和振动信号分析,提出了一种可控制爆破能量延迟释放的减振方案。根据不同的爆破掘进情况,人们还提出了一些比较新颖、有效的减振技术,如减小掘进方向爆破振动的气垫法<sup>[13]</sup>、大孔镗削切割爆破法<sup>[14]</sup>、先进电子雷管起爆技术<sup>[15]</sup>等。然而,考虑既有结构物自身所受载荷与隧道爆破耦合作用下结构物的减振行为的研究却鲜有报道。

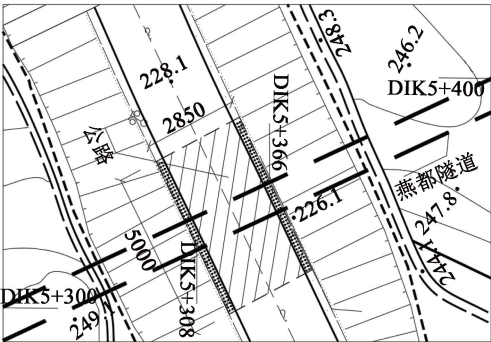
以国家铁路重点工程项目燕都隧道为例,针对下穿既有环城公路段隧道爆破开挖产生的振动响应,同时考虑公路上方车辆瞬时载荷耦合作用,在隧道和公路之间合理布置有效的减振孔,综合分析了下穿环城公路的减振效应。

## 1 工程背景

燕都隧道位于辽宁省朝阳市双塔区他拉皋镇姜家窝铺村境内。隧道进口里程DK4+868,出口里程DK6+000,全长1 132 m,最大埋深为52.6 m。隧道DK5+250~DK5+450段200 m范围内依次下穿环城公路及人行天桥基础。其中,DK5+337断面下穿环城公路,与公路垂直相交。隧道埋深约18~22 m。公路等级为城市道路,路面宽24 m。隧道与环城公路位置如图1所示。



(a) 隧道-公路现场照片



(b) 隧道-公路平面分布图

图1 隧道下穿环城公路示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of the tunnel under the ring road (unit:m)

研究区围岩分级为V级,无复杂地质构造。隧道爆破时采用中部超前小导洞先行爆破,先行5 m,随后,光爆层开始同步跟进。小导洞爆破采用中部直眼掏槽方式,在2排掏槽眼之间,均匀布置3个空眼,最外侧4个掏槽眼设置起爆时间为0、5、10、15 ms。现场采用2#岩石乳化炸药,正向不耦合装药,起爆点为从外到内,炮孔直径42 mm,炮孔深度为1 m,单个炮孔装药量为0.56 kg,总装药量为3.36 kg。基于中部超前小导洞先行爆破所产生的爆炸载荷作用,分别对设置减振孔和未设减振孔两种工况下隧道爆破进行了缓冲减振研究。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型构建

在ANSYS/LS-DYNA中建立三维有限元数值模型,模型尺寸为100 m×50 m×60 m。隧道置于模型中部,走向为z负向;公路在隧道上方,走向为x正向,空间位置与隧道正交。减振孔布置在隧道及公路之间。隧道、公路、减振孔、炸药及空气均采用Solid164单元,设置相应的材料属性,通过Sweep方式共划分247 747个网格单元、265 781个节点。由于模型对称,测点布置在模型左半部分。减振孔周围布置3个测点;在路面的左、右两侧和中部位置各设1个测点;且每隔10 m设置1组监测路面,总共设置4组监测路面。各测点在有限元数值模型中的布置如图2所示。

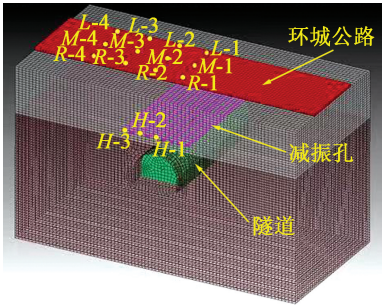


图2 有限元数值模型及测点布置

Fig.2 Finite element numerical model and monitoring point layout

### 2.2 减振孔布置

布置减振孔是为了阻隔和干扰隧道爆破产生的地震波向地表公路进行传播,加快地震波的衰减,降低其对公路的振动效应<sup>[16]</sup>。布置方案如下:减振孔共9个,距隧道顶板5 m,孔径120 mm,孔深20 m,孔距1.2 m。选用一定比例的泡沫铝和砂土混合,

作为填充材料,并在端口处封堵密实。

2.3 参数设置

隧道围岩主要是砂岩和砾岩,在 LS-DYNA 材料库选择 \* Mat\_Plastic\_Kinematic 材料模型。实际测得围岩的物理力学参数如表 1 所示。

减振孔填充材料选择可压扁泡沫材料模型 \* Mat\_Crushable\_Foam。

炸药选用 \* Mat\_High\_Explosive\_Burn 高能炸药材料模型,并添加关键字 \* EOS\_JWL 对状态方程进行描述,具体参数如表 2 所示<sup>[17]</sup>。

空气选用 \* Mat\_Null 材料模型。公路选用 JHC 材料模型 \* Mat\_Johnson\_Holmquist\_Concrete。

2.4 流固耦合设置

在定义单元算法时,将围岩、减振孔和上方公路设置为 Lagrange 单元算法,空气和炸药采用 ALE 单元算法,通过 \* ALE\_Multi-Material\_Group 定义多物质 ALE 单元,使得 ALE 单元之间能够相互作用,Lagrange 单元和 ALE 单元采用共节点的形式。通过 \* Constrained\_Lagrange\_in\_Solid 来控制流固耦合的相关设置。对围岩四周采用无反射边界条件,用来避免反射波对结果的影响。

2.5 车辆载荷设置

车辆载荷不同于地震等其他动载荷,它具有时间短、频率高等特点。在这种载荷形式作用下,公路的振动响应是不同的。汽车在正常行驶过程中对路面某一点产生的载荷时间非常短,一般在 0.01 ~ 0.10 s 之间。为真实地反映车辆动载荷的特点,采用双频率正弦波<sup>[18]</sup>模拟交通载荷。

$$p(t) = p_0 + k_1 p_0 \sin \omega_1 t + k_2 p_0 \sin \omega_2 t。$$
(1)  
式中: $p_0$  为汽车载荷; $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为动载荷的振动原频率; $k_1$  和  $k_2$  为两个主频的动载荷分担系数, $k_1 + k_2$  为车辆的动力放大系数。

对该路段上车辆进行调查分析;考虑车辆两轴

作用,车辆空车质量 120 kN,满载时载荷总质量 300 kN,选取满载 80% 下的载荷作为主要载荷;轮胎分布面积取  $(30 \times 24 \times 4)$  cm, $\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为主频 4 Hz 和 10 Hz 对应的圆频率;车速 72 km/h 时,动载荷放大系数取 0.28,相应地,取  $k_1 = 0.18$ 、 $k_2 = 0.10$ 。

3 计算结果分析

3.1 减振孔部位振速分析

为了更好地反映减振孔的缓冲减振效果,分别对设置减振孔和未设减振孔两种工况下隧道爆破进行数值模拟。选取两种工况下相同位置的测点,提取减振孔周边测点的水平振速和垂直振速时程曲线,如图 3 ~ 图 5 所示。

从 3 个测点的振速时程曲线可以看出,在前 0.005 s 内,未设减振孔和设减振孔两种工况下的振速变化几乎重合。随着时间的增加,二者振速的振动频率、方向都高度相近,而振幅差异明显。在测点 H-1 处,水平方向的减振率为 41.7%,垂直方向的减振率为 30.7%。在测点 H-2 处,水平方向的减振率为 33.0%,垂直方向的减振率为 26.1%。在测点 H-3 处,水平方向的减振率为 31.4%,垂直方向的减振率为 22.7%。减振孔的布置改变了地应力的分布规律,使得爆破产生的地震波波速在传播过程中受到阻隔和干扰,从而降低周边围岩的振速。水平方向减振率明显高于垂直方向减振率。由于减振孔的位置相对于爆心较近,公路上方车辆载荷对其产生的作用较小。因此,减振孔周边振速主要是受到地震波的影响。而地震波产生水平方向的扰动大于垂直方向的扰动,因此,设置减振孔较大程度降低了水平方向的扰动影响。

3.2 公路路面振速分析

公路路面各个测点的振速时程曲线不尽相同。

表 1 围岩物理力学参数

Tab. 1 Physical mechanics parameters of surrounding rock

围岩	抗拉强度 $R/\text{MPa}$	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	内聚力 $C/\text{MPa}$
砂岩	31.9	25.6	12.1	0.19	41.4	7.9
砾岩	20.5	23.0	11.2	0.21	27.5	1.5

表 2 炸药材料参数

Tab. 2 Material parameters of explosives

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	爆速 $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	爆轰压力 $p_{\text{ej}}/\text{GPa}$	材料相关 参数 $A/\text{GPa}$	材料相关 参数 $C/\text{GPa}$	炸药特征 参数 $R_1$	炸药特征 参数 $R_2$	炸药材料 参数 $\omega$	初始质量 热力学能 $E_0/\text{GPa}$
1 100	3 500	4	214	0.182	4.15	0.95	0.3	4.192

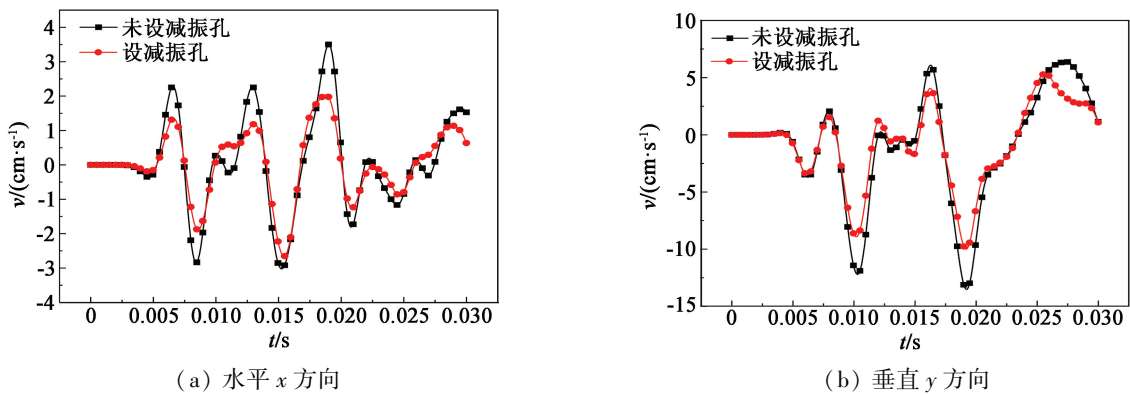


图 3 测点  $H-1$  的振速时程曲线

Fig. 3 Vibration velocity time history curves of monitoring point  $H-1$

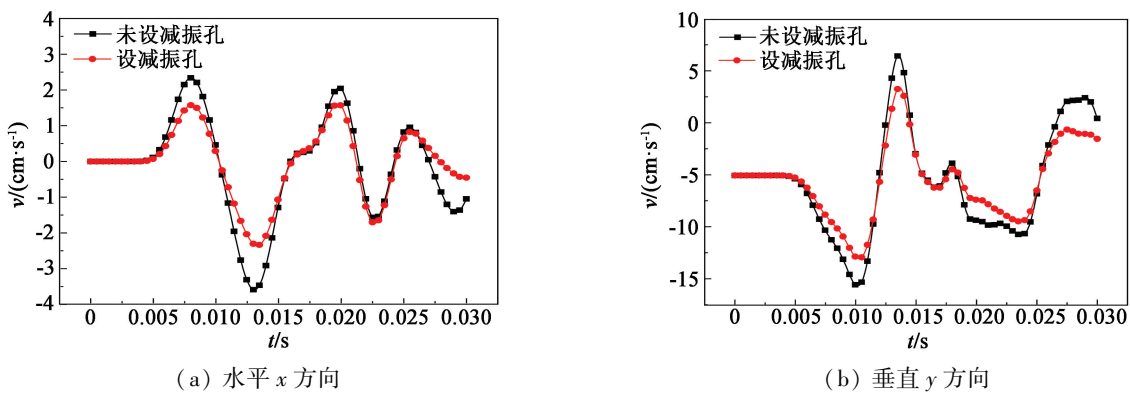


图 4 测点  $H-2$  的振速时程曲线

Fig. 4 Vibration velocity time history curves of monitoring point  $H-2$

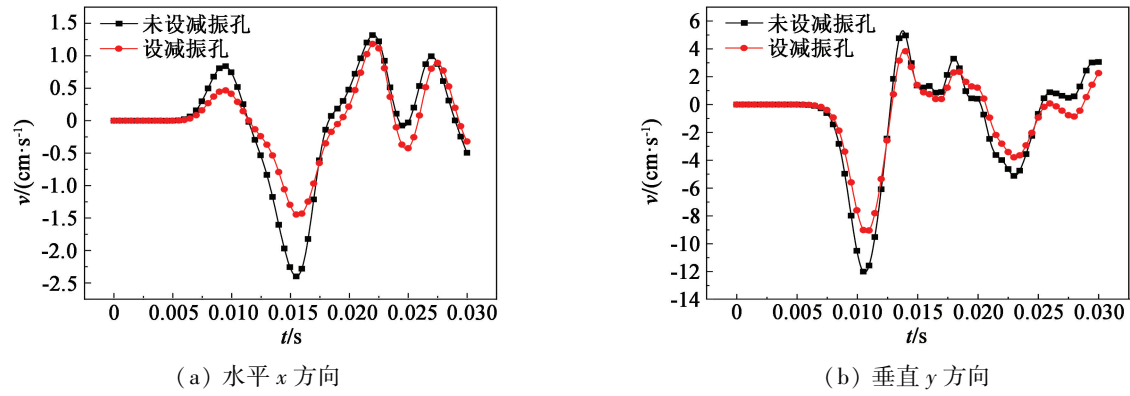


图 5 测点  $H-3$  的振速时程曲线

Fig. 5 Vibration velocity time history curves of monitoring point  $H-3$

以路面测点  $M-1$  为例,图 6 显示了在未设减振孔和设有减振孔两种工况下水平及垂直方向上公路路面质点的振速时程曲线。从图 6(a)和图 6(b)对比可以看出:未设减振孔,水平方向振速峰值的波动主要发生在 0.008 ~ 0.018 s 和 0.023 ~ 0.028 s 时段;持续时间分别为 0.010 s 和 0.005 s,分布不均,最大值为 10.35 cm/s。而设有减振孔的振速极值波动主要集中在 0.010 ~ 0.018 s 内,持续时间为 0.008 s;整体波动幅度降低,最大值为 8.37 cm/s。水平方向减

振率为 19.1%。观察图 6(c)和图 6(d):未设减振孔,垂直方向的振速波动范围较广,大幅波动的持续时间为 0.015 s,幅度变化较大,最大值为 13.74 cm/s;而设有减振孔的振速波动范围减小,持续时间为 0.008 s,最大值为 11.38 cm/s,垂直方向减振率为 17.2%。对比两种工况,设有减振孔的公路路面大幅波动的持续时间减少了 50%。

公路路面距离爆心较远,其主要受到上方车辆载荷的作用。车辆载荷会对路面施加一个应力波,



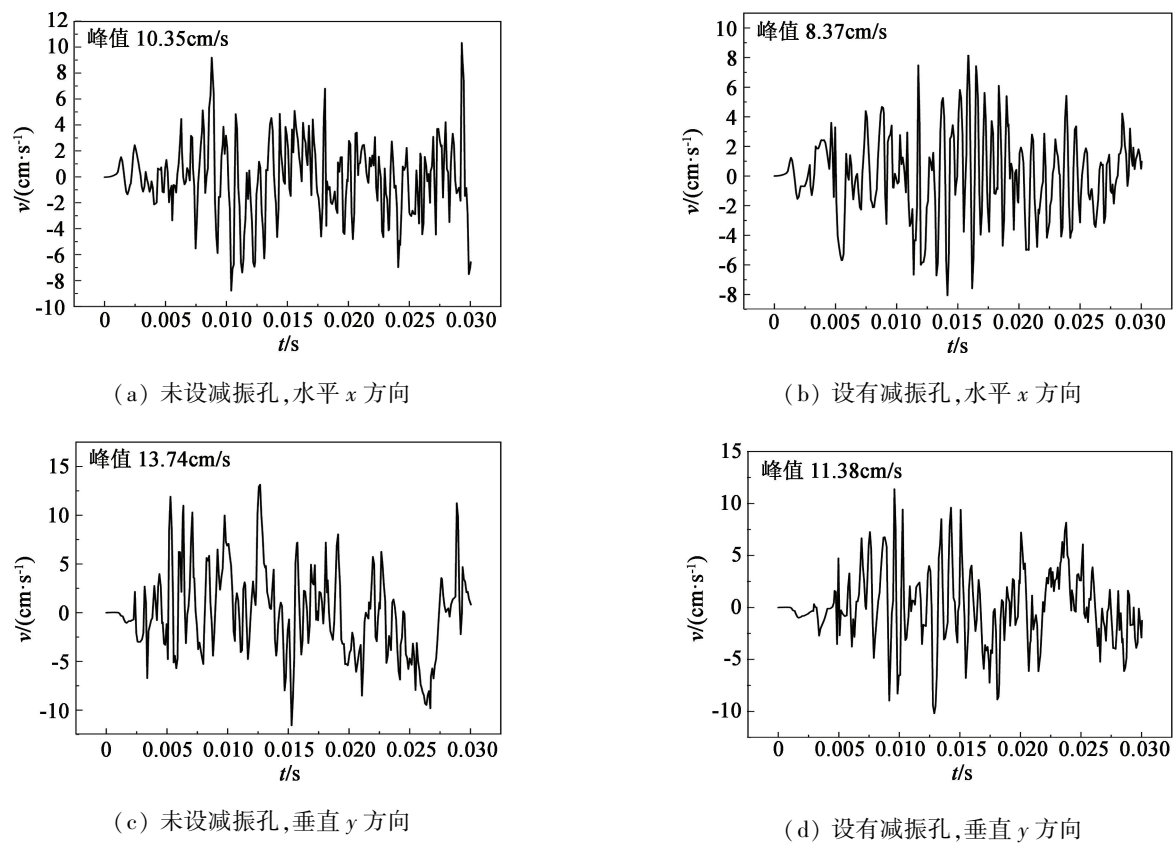


图 6 路面测点  $M-1$  的振速时程曲线

Fig. 6 Vibration velocity time history curves of monitoring point  $R-M-1$  on highway pavement

应力波会向岩层中传播。当爆破产生的地震波和应力波相遇时,两波会进行一个叠加。减振孔的布置一方面减弱了地震波的传播,另一方面也降低了两波的叠加效应。因此,在隧道爆破和公路车辆载荷作用下,减振孔可以有效降低路面振速大幅波动的持续时间和幅度大小,使得公路的振动效应更趋于平稳。

两种工况下公路路面各个测点的振速峰值的计算与实测数据如表 3 所示。从表 3 中可看出,实测振速峰值与数值模拟结果在同一量级,且二者相差不大,说明数值模拟结果具有一定的合理性。在爆破和车辆载荷耦合作用下,水平方向和垂直方向最大减振率均发生在监测路面 1#的中部,减振率分别为 19.1% 和 17.2%。沿着公路走向,即沿路面 1#至路面 4#,随着与爆心距离的增大,减振率在逐渐减小。从 4 个监测断面公路左、右两侧与中部位置振速的比较都可得出,公路两侧减振率相差不大,中部减振率要高于两侧的减振率。由于公路两侧为临空面,振动幅度较大,且两侧位置距离爆心较远,地震波衰减导致其振动水平本身就比较小,故减振效果不及中部位置。

3.3 公路路面应力分析

以公路路面中部测点为例,其 Mises 等效应力时程曲线如图 7 所示。从图 7(a)中可看出,未设减振孔时,路面中部的应力大幅波动的时间范围主要集中在 0.005-0.010 s 和 0.028 ~ 0.030 s 之间,应力最大值为 3.9 MPa。而设有减振孔工况下[如图 7 (b)所示],应力时程波动曲线大致呈山字状,即在中间时段 0.010 ~ 0.020 s,应力波动较大,而在初始 0 ~ 0.010 s 和末尾 0.020 ~ 0.030 s 时段,应力波动较小,最大值为 3.5 MPa。由于公路上方车辆载荷作用产生的应力波与隧道爆破产生的地震波会在岩层中产生叠加,公路路面的等效应力即是此叠加的结果。未设减振孔下,岩层中应力状态基本稳定,叠加效应明显;在初期一段时间内,应力大幅波动,且在末尾时段产生二次波动。设置减振孔改变了岩层中的应力状态,使应力重新分布;同时,也适当减弱了地震波的传播速度。当两波叠加时,应力大幅波动的时间延后,且持续时间缩短,叠加后的应力幅值也大幅降低。这说明减振孔可改变应力传播的路径,降低应力波和地震波的叠加效应,使得公路路面受到的应力减小,并且降低应力大幅波动的持续时

表3 两种工况下公路路面测点的减振率

Tab. 3 Vibration reduction rate of monitoring points on highway pavement under two working conditions							
监测路面	测点	水平方向振速/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		水平方向 减振率/%	垂直方向振速/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		垂直方向 减振率/%
		无减振孔	有减振孔		无减振孔	有减振孔	
1 <sup>#</sup>	L-1	6.24(5.86)	5.21	16.5	15.71(12.76)	13.21	15.9
	M-1	10.35	8.37	19.1	13.74	11.38	17.2
	R-1	8.22(7.79)	6.83	16.9	14.61(12.51)	12.32	15.7
2 <sup>#</sup>	L-2	9.24(8.64)	7.77	15.9	14.68(13.45)	12.72	13.3
	M-2	12.82	10.62	17.3	13.15	11.14	15.6
	R-2	9.55(8.12)	8.06	15.6	15.69(13.27)	13.58	13.4
3 <sup>#</sup>	L-3	15.85(12.57)	13.57	14.4	16.28(14.12)	14.26	12.4
	M-3	13.84	11.61	16.1	14.88	12.65	15.0
	R-3	15.06(12.35)	12.86	14.6	15.26(14.35)	13.32	12.7
4 <sup>#</sup>	L-4	13.25(12.27)	11.51	13.1	16.56(14.72)	14.63	11.8
	M-4	14.45	12.24	15.3	15.54	13.25	14.7
	R-4	12.66(11.94)	10.86	14.2	16.13(14.42)	14.12	12.6

注:括号内的数值为实际监测的振速峰值,公路中部位置未有实测数据。

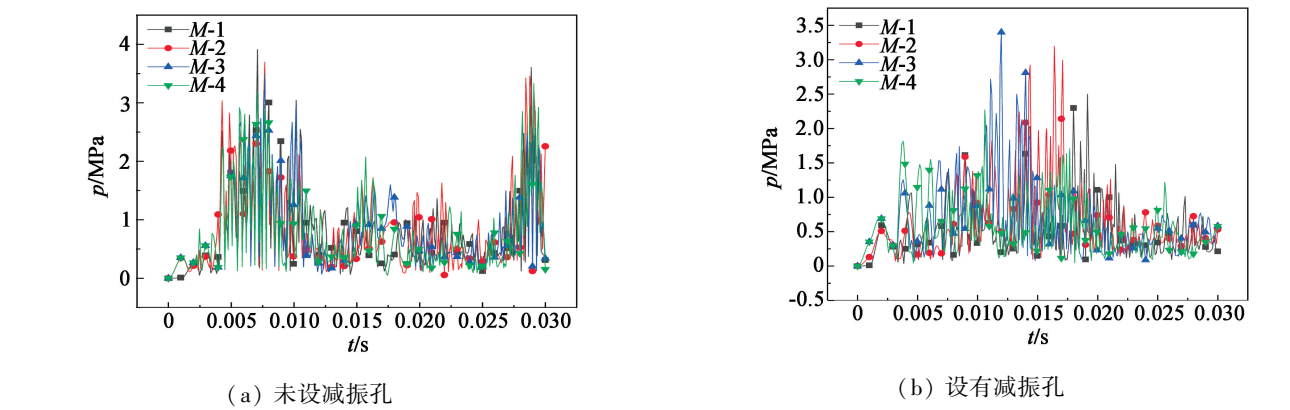


图7 路面中部测点的应力时程曲线

Fig.7 Stress time history curves of the monitoring points in the middle of the road surface

间。这也和路面振速的分析相对应。

4 结论

以燕都隧道 DIK5 + 337 断面下穿既有环城公路的爆破研究为工程背景,利用 LS-DYNA 分别对设置减振孔和未设减振孔两种工况下的隧道爆破进行数值模拟,分析在爆破开挖和车辆载荷耦合作用下的缓冲减振效应,得出以下结论:

- 1)在减振孔周边,最大减振率约为 41.7%,水平方向减振率明显高于垂直方向减振率。设置减振孔可有效降低隧道爆破对周边振动的影响。
- 2)公路路面的最大减振率发生在中部,约为 19.1%。设置减振孔使公路振速大幅波动的持续时间减少了 50%。减振孔可以有效降低路面振速波动,使得公路的振动效应更趋于平稳。

3)减振孔可使应力大幅波动的时间延后且持续时间缩短,降低应力波和地震波的叠加效应。

参考文献

[1] ZHOU Y, FENG S W, LI J W. Study on the failure mechanism of rock mass around a mined-out area above a highway tunnel: similarity model test and numerical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 118: 104182.

[2] 于建新,郭敏,陈晨,等. 城市超浅埋小净距隧道爆破振动响应特性研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1): 272-277.

YU J X, GUO M, CHEN C, et al. Blasting vibration response characteristics of urban super-shallow buried small clear distance tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Suppl. 1): 272-277.

- [3] 周兵, 王传生, 刘芳亮, 等. 城市交通隧道运营安全风险评估模型及管理系统研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 97-103.  
ZHOU B, WANG C S, LIU F L, et al. Study on risk assessment model and management system for urban traffic tunnel operation safety [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(1): 97-103.
- [4] 张旭, 周传波, 蒋楠, 等. 下穿地铁隧道爆破作用下人防隧道的动力效应[J]. 爆破, 2021, 38(3): 10-18.  
ZHANG X, ZHOU C B, JIANG N, et al. Dynamic effect of civil air-defense tunnel induced by blasting of under-crossing subway tunnel[J]. Blasting, 2021, 38(3): 10-18.
- [5] 罗阳, 杨建辉, 胡东荣. 小净距隧道围岩的爆破振动影响规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1309-1313, 1336.  
LUO Y, YANG J H, HU D R. Study on the impact of blasting vibration on surrounding rock of small clearance tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1309-1313, 1336.
- [6] 谢全民, 黄小武, 赵东华, 等. 地铁隧道爆破振动测试及时频特征分析[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 48-53.  
XIE Q M, HUANG X W, ZHAO D H, et al. Analysis of time-frequency characteristics in blasting vibration test of subway tunnel[J]. Explosive Materials, 2020, 49(6): 48-53.
- [7] 高宇璠, 傅洪贤. 近距离下穿既有盾构隧道的隧道钻爆降振技术研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(2): 321-328.  
GAO Y F, FU H X. Drilling and blasting technology for closely crossing existing shield tunnel[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 321-328.
- [8] 张国胜, 郭斌, 刘永亮, 等. 露天矿爆破时砖混结构房屋振动响应的模态参数识别与爆破减振方法[J]. 爆破器材, 2021, 50(4): 54-59.  
ZHANG G S, GUO B, LIU Y L, et al. Modal parameter identification of vibration response of brick concrete building and blasting vibration reduction during blasting in open pit mine[J]. Explosive Materials, 2021, 50(4): 54-59.
- [9] 石洪超, 邹新宽, 张继春, 等. 层状围岩小净距隧道减振掘进爆破技术试验研究[J]. 爆破, 2015, 32(4): 1-5.  
SHI H C, ZOU X K, ZHANG J C, et al. Experimental study on vibration reduction blasting in small-distance tunnel in stratiform surrounding rock [J]. Blasting, 2015, 32(4): 1-5.
- [10] 牛泽林, 吴焕通, 綦彦波, 等. 大断面浅埋隧道下穿既有建筑群爆破减震模型试验与研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 129-133.  
NIU Z L, WU H T, QI Y B, et al. Blasting vibration reduction model for large-section shallow tunnels approaching existing buildings [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(4): 129-133.
- [11] 张袁娟, 黄金香, 袁红. 缓冲爆破减震效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 967-973.  
ZHANG Y J, HUANG J X, YUAN H. Study of shock absorption effect of buffer blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 967-973.
- [12] TIAN X X, SONG Z P, WANG J B. Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105813.
- [13] PARK D, JEON S. Reduction of blast-induced vibration in the direction of tunneling using an air-deck at the bottom of a blasthole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(5): 752-761.
- [14] KIM M S, LEE S S. The efficiency of large hole boring (MSP) method in the reduction of blast-induced vibration[J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1814.
- [15] IWANO K, HASHIBA K, NAGAE J, et al. Reduction of tunnel blasting induced ground vibrations using advanced electronic detonators[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 105: 103556.
- [16] 李克先, 赵继增, 雷刚. 隧道控制爆破深大减振孔减振效果对比[J]. 隧道建设, 2015, 35(6): 595-600.  
LI K X, ZHAO J Z, LEI G. Study on vibration-reducing effect of deep and large vibration-reducing hole: case study on control blasting of a shallow-buried mined station of Qingdao metro[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(6): 595-600.
- [17] 夏祥, 李海波, 李俊如, 等. 岩体爆生裂纹的数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1987-1991.  
XIA X, LI H B, LI J R, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1987-1991.
- [18] 赵健, 李振存, 郭昕, 等. 汽车荷载作用下沥青路面公路动力响应数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(5): 83-89.  
ZHAO J, LI Z C, GUO X, et al. Numerical analysis of bitumen-surface highway dynamic response under vehicle loads[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(5): 83-89.